

# 高炉セメントを使用したプレパクトコンクリートに関する基礎研究

齋藤二郎 堅川孝生  
芳賀孝成 十河茂幸

## Fundamental Studies of Prepacked Concrete Using Slag Cement

Jiro Saito Takaiki Tatekawa  
Takashige Haga Shigeyuki Sogo

### Abstract

The use of slag cement for prepacked concrete has increased recently since it has become very difficult to obtain fly ash. As the basic properties of prepacked concrete using slag cement had not been sufficiently determined, the authors carried out experiments including studies on admixtures and aluminum powder and examined the adaptability of such prepacked concrete to large-scale projects. With the consideration of use in mass concrete, adiabatic temperature rise tests and strength tests of mortars with high proportions of slag cement were carried out. As a result of the tests it was ascertained that the use of slag cement in massive prepacked concrete is quite practicable.

### 概要

フライアッシュの入手難からプレパクトコンクリートに高炉セメントを使用する事が多くなってきたが高炉セメントを使用したプレパクトコンクリートの基礎的な性質は十分に求められていない。そこで混和剤、アルミニウム粉末等に関する実験を行ない、大規模な工事への適用性を検討した。またマスコンクリート対策として、高炉スラグの割合を高くしたモルタルの断熱温度上昇と強度試験を行なった。その結果高炉セメントは大規模なプレパクトコンクリート工事に十分使用可能な事がわかった。

### 1. まえがき

構造物の大型化にともない施工性の面からプレパクトコンクリートによって水中構造物を構築する事が多くなってきた。プレパクトコンクリートはPreplaced Aggregate Concrete ともいわれるように粗骨材を型わくに先詰めし、その空隙に膨脹性のモルタルを注入し一体コンクリート構造物とする方法である。流動性、水和熱、耐久性などの問題から混和材としてフライアッシュを使用することが一般的となっているが石炭を燃料とする火力発電所が減少し、フライアッシュの入手が困難となり、このため大規模な工事については手軽に入手できる高炉セメントを使用する事も多くなって来た。この高炉セメントは溶鉱炉から排出される鉱滓を急冷して得られる高炉スラグをセメントクリンカーと混合粉砕したもので、粒形がフライアッシュのように球形でないため流動性はフライアッシュ

セメントよりは劣るが、発熱、耐久性等から今後とも使用量は増大するものと思われる。そこで高炉セメントを使用したプレパクトコンクリートを大規模な工事にも適用する事を目的として、混和剤、アルミニウム粉末等に関する実験を行ない、高炉セメントプレパクトコンクリートの基礎的な性質について検討を加えた。またマスコンクリートの発熱対策として高炉スラグの割合を高くしたモルタルを使用することを考えて、この場合のモルタルの圧縮強度および断熱温度上昇の測定を行ない、その可能性について検討を行なった。

### 2. 実験概要

#### 2.1. 使用材料

2.1.1. セメント セメントは秩父社製の普通セメント（比重3.17・ブレン 3110cm<sup>2</sup>/g）およびB種高炉セメント（比重3.06, ブレン 3710cm<sup>2</sup>/g）を使用した。

2.1.2. 細骨材 細骨材は栃木県鬼怒川産の川砂 (比重2.55, M. S. =1.2mm, F. M. =2.02)を使用した。

2.2. 実験方法

2.2.1. 減水剤の効果について 高炉セメントを使用したプレパックドコンクリート用モルタルに対する減水剤の効果について検討するため、8種類の市販減水剤について減水率、ブリージング率の測定および硬化モルタルの圧縮強度試験を行なった。

(1) 使用減水剤

- (a) P<sub>0</sub> 主成分……リグニンスルホン酸カルシウム 標準使用量C×0.2~0.5%
- (b) M<sub>1</sub> 主成分……アルキルアリルスルホン酸高分子重合体 標準使用量C×0.2~0.25%
- (c) C 主成分……ポリオキシエチレンアルキルアリルエーテル 標準使用量C×0.04%
- (d) M<sub>y</sub> 主成分……βナフタリンスルホン酸ホルマリン縮合物 標準使用量C×0.4%
- (e) M<sub>T</sub> 主成分……メラミンホルムアルデヒド重合体ナトリウム塩 標準使用量C×0.5~1.5%
- (f) P<sub>5</sub> 主成分……アルキルアリルスルフォネートのポリマー 標準使用量C×1%
- (g) N 主成分……多環アロマスルホン酸塩 標準使用量C×2.5~4.5%
- (h) O 主成分……オキシカルボン酸 標準使用量C×0.2%

2.2.2. フレッシュモルタルの性質に及ぼす温度の影響について 高炉セメントを使用したフレッシュモルタルの基礎的性状を把握するため水セメント比とフロー値、フロー値の経時変化、膨脹率の時間変化および凝結時間の測定を行なった。

2.2.3. アルミニウム粉末添加量と強度について 圧力とアルミニウム粉末添加量の基礎的資料を得るためアルミニウム粉末の添加量を0~0.1%まで4種類に変化させφ11cm×600cmの円柱供試体を作成し、その強度分布を求めた。

2.2.4. 高炉スラグの割合を多くしたモルタルの発熱と強度について 粉末度の異なった2種類の高炉スラグを使用しスラグの割合を70%~90%に変化させたモルタルの断熱温度上昇と強度試験を行ないマスコンクリート構造物に対する可能性について検討を行なった。

2.2.5. アルミニウムの反応に関する実験

アルミニウム粉末の水素発生反応に及ぼす温度、混和材の影響について検討を加えるため図-1に示すような装置を使用し反応性実験を行なった。

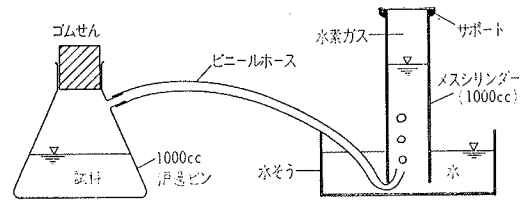


図-1 水素ガス発生実験装置

3. 実験結果とその考察

3.1. 減水剤の効果について

フロー値を17±2秒とした時の減水率、ブリージング率、材齢7日および材齢28日におけるモルタルの圧縮強度を図2~5に示す。

(1)減水率について 各種減水剤とも添加量の増大にもない減水率も増加する。しかしCはほとんど減水効果はなく、練り置き後5分くらいでクリーム状と

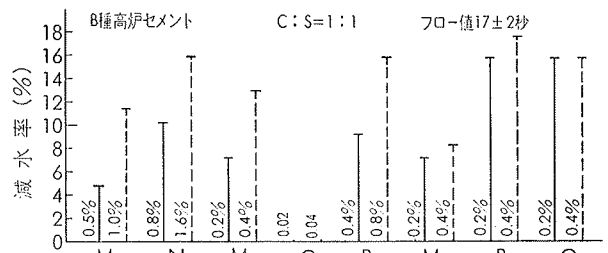


図-2 各種混和剤の減水効果

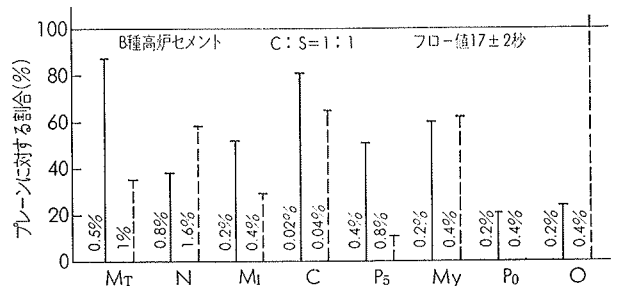


図-3 ブリージング率測定結果 (ブレンを100とした指数)

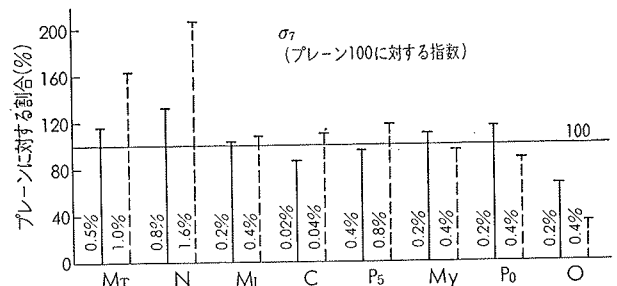


図-4 モルタルの圧縮強度試験結果(ブレンを100とした指数)

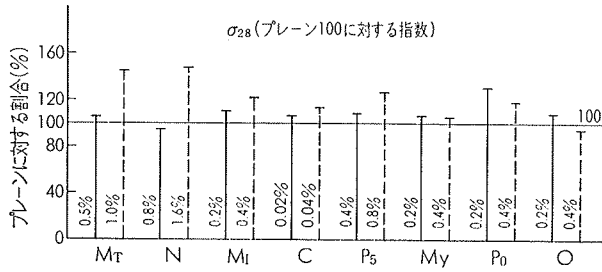


図-5 モルタルの圧縮強度試験結果  
(プレンを100とした指数)

なりフロー値の測定は不可能となった。

(2)ブリージングについて 添加量の増大にともなう減水効果によりほぼブリージング率は添加量の多いものほど減少する傾向を示すがN, Oは逆に増大した。とくにOはプレンのものよりもむしろ増大した。

(3)圧縮強度について 材齢7日強度ではMTの2倍量使用のものはプレんに比べて1.6倍, Nで2.1倍と早強性を示す。P0の2倍量およびOは遅延性があるため減水効果があるにもかかわらず強度発現が遅れる。しかし材齢28日になるとほぼ回復を示す。

### 3.2 フレッシュモルタルの性質におよぼす温度の影響について

水セメント比とフロー値との関係を図-6に, フロー値の経時変化を図-7に, 練り混ぜ時間とフロー値との関係を図-8に, 膨脹率の経時変化を図-9および10に, 凝結時間の測定結果を図-11に示す。

(1)水セメント比とフロー値との関係について 同一フロー値に対する水セメント比は5°Cから30°Cに上

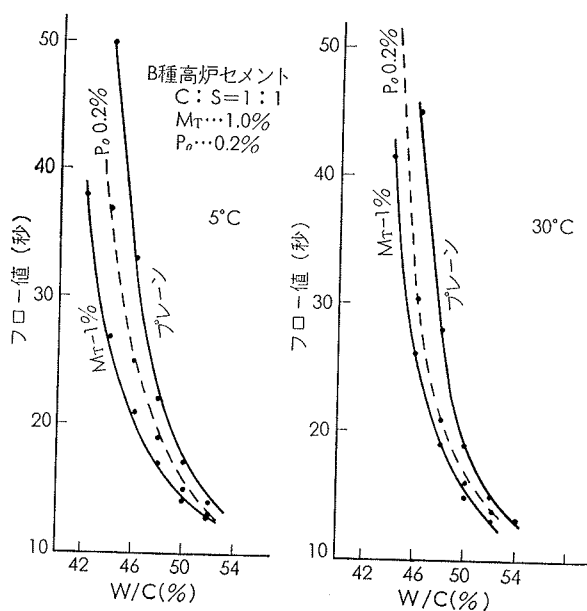


図-6 水セメント比とフロー値との関係

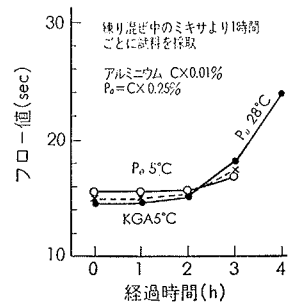


図-7 フロー値の経時変化

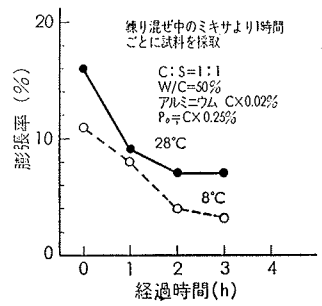


図-8 膨脹率の変化

昇すると約2%大きくする必要があり。また減水剤の減水効果は大きいとその効果はモルタル温度が上昇するにつれて小さくなり, 同じ効果を期待するためには温度が高い場合には低い場合に比べてやや多目に添加する必要がある。

(2)フロー値の経時変化について 温度が高くなる

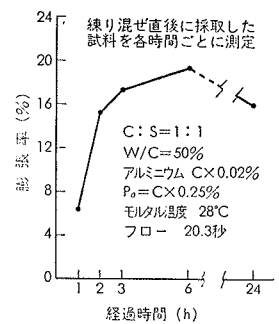


図-9 膨脹率の経時変化

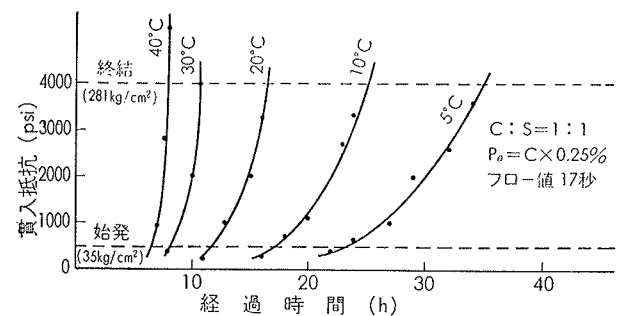


図-10 モルタルの凝結試験結果

と長時間の練り混ぜによってフロー値はやや大きくなるが練り混ぜ後3時間経過してもなお, ほぼ一定のフロー値を示す。しかし静止させたモルタルはクリーム状を呈してくるのでアジテーターで攪拌を続ける必要がある。また図-9のように練り混ぜ続けている試料より時間ごとに採取した材料の膨脹率は時間とともに低下し, モルタルの品質に低下する。膨脹量で表わせばモルタル温度28°Cの場合1時間で練り混ぜ直後に比べ44%, 8°Cの場合で27%低下する。

(3)膨脹率の時間変化について 図-10は練り混ぜ直後に採取した試料に対して時間ごとにその膨脹量を測定した結果であるが1時間ですでに6.3%の膨脹を示し, 温度が高い場合にはアルミニウムの反応が早急なことがわかる。

(4)凝結時間について 遅延型減水剤 P0 はセメン

ト量の0.25%添加しているが40°Cで始発6時間40分、終結8時間となる。しかし5°Cになると始発23時間30分、終結35時間20分にもおよび大規模な注入工事では気温が低い場合には遅延タイプの減水剤の使用は問題があり、むしろ標準タイプの減水剤の使用が望まれる。

3.3. アルミニウム粉末添加量と強度について

(1)アルミニウム粉末の効果について 膨脹しないものおよび膨脹率3.8%のモルタルおよびプレパックドコンクリートの強度を図-11に示す。アルミニウム粉末を0.01%添加したものとしないものとのモルタルおよびプレパックドコンクリートの強度を示すが添加しないもののモルタル強度が添加したもののモルタル強度を大きく上まわる。プレパックドコンクリートではその関係が逆転する。これはプレパックドコンクリートでは添加しないものはブリージングによって粗骨材下面に空隙が発生するためアルミニウム粉末は発生する水素ガスによってモルタルを膨脹させこの空隙を埋める。このため本実験ではアルミニウム粉末0.01%を添加したものは添加しないものに対して11~28%の強度増加がみられた。

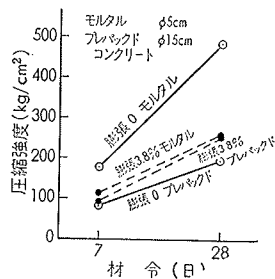


図-11 圧縮強度試験結果

(2)アルミニウム粉末添加量と強度分布について アルミニウム粉末添加量を変化させた場合の圧縮強度分布を図-12に示す。圧縮強度は多少バラついているがアルミニウム添加量0.01%のものの強度が全体として大きく少量のアルミニウム粉末はプレパックドコンクリートの強度改善に効果のあることを示している。また添加量の多いものは右下がりの強度分布を示し、

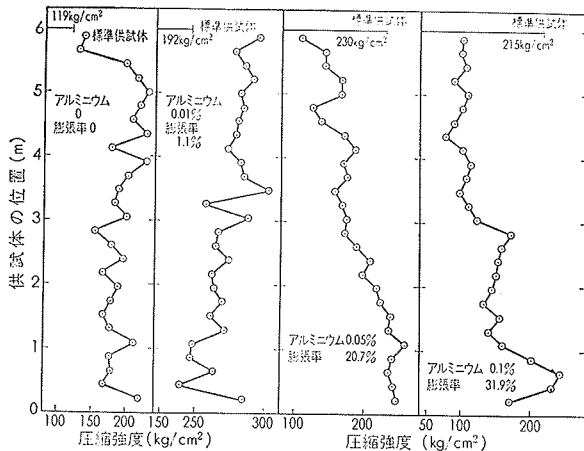


図-12 圧縮強度の垂直分布

過度の添加は圧力の小さな浅い所ほど有害な結果をもたらす。圧力とアルミニウム粉末添加量との関係はさらに研究を進める必要がある。

3.4. 高炉スラグの割合を多くしたモルタルの発熱と強度について

(1)圧縮強度について 粗目スラグ (ブレン2000 cm<sup>2</sup>/g) を使用したモルタルの圧縮強度試験結果を図-13に、細目スラグ (ブレン4000 cm<sup>2</sup>/g) を使用したモルタルの圧縮強度試験結果を図-14に示す。粗目スラグモルタルの場合砂比2のもの強度はかなり弱くスラグの割合が60%のもので  $\sigma_{28}=154 \text{ kg/m}^2$ ,  $\sigma_{91}=221 \text{ kg/m}^2$  しか強度を示さない。強度はスラグの割合が減少するにしたがってほぼ直線的に増加するが材齢91日ではスラグの反応硬化によって70%のものと60%のものとの差があまりみられなくなる。砂比1の強度は砂比2の場合と同じくスラグの割合が少なくなるにしたがってほぼ直線的に増加する。 $\sigma_{91}$ では70%のものが60%のものよりも高い強度を示す。細目スラグの場合圧縮強度がスラグ+セメントをセメントと考えた場合のセメント水比に比例すると仮定して最少二乗法で求めると次のようになる。

スラグ / (セメント + スラグ) = 70%

$$\sigma_{91} = 146.8C/W + 115$$

$$\sigma_{28} = 174.8C/W + 24$$

スラグ / (セメント + スラグ) = 90%

$$\sigma_{91} = 196.0C/W - 69$$

$$\sigma_{28} = 229.5C/W - 170$$

スラグの割合が70%のものは  $\sigma_{91}$  でほぼ 300 kg/m<sup>2</sup> 以上の強度が得られるが  $\sigma_{28}$  で 300 kg/m<sup>2</sup> の強度を得るためにはフロー値13~25秒程度の注入モルタルで

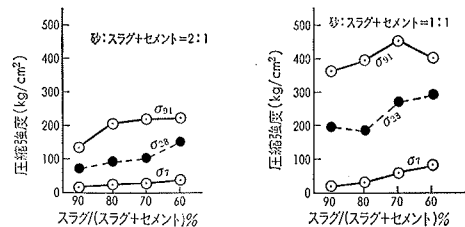


図-13 粗目スラグモルタル圧縮強度試験結果

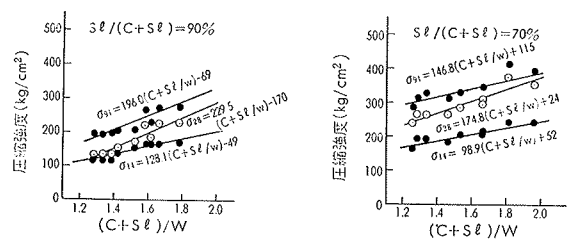


図-14 細目スラグモルタル圧縮強度試験結果

は砂比 1.5 以下にする必要がある。スラグの割合が 90% のものは材齢 91 日でも 300 kg/m<sup>2</sup> 以上の強度を得る事は困難である。

(2)断熱温度上昇について 断熱温度上昇測定結果を図-16に示す。強度的な問題から粗目スラグは砂比 1, 細目スラグは 2 としたが図-15にみられるようにセメントの割合が高くなるにしたがって上昇温度も高くなり, 時間当りの温度上昇割合も高くなる。図-15より最高温度を読み取り単位ポルトランドセメント量と最高上昇温度との関係を示したのが図-16である。

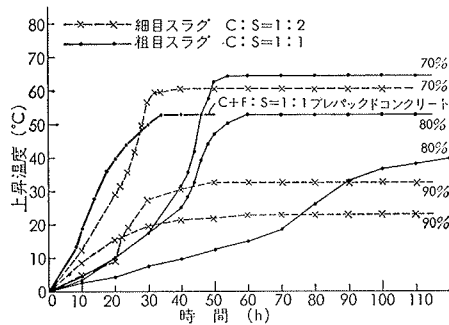


図-15 断熱温度上昇測定結果

その発熱による温度上昇高はスラグの発熱がないと仮定すれば細目スラグモルタルの場合単位ポルトランドセメント量 10kg 当り, 2.03deg の温度上昇となり, 粗目スラグの場合は 1.15deg~3.39deg 平均 2.27deg の上昇となる。

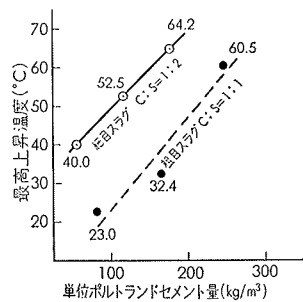
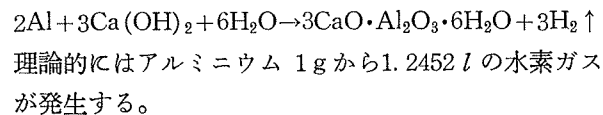


図-16 単位ポルトランドセメント量と温度との関係

### 3.5. アルミニウムの反応性について

プレキャストコンクリートにはアルミニウム粉末を含んだ混和剤を添加し, その膨脹力によってモルタルと粗骨材との付着を向上させる。アルミニウム粉末とセメント中のアルカリ分との反応式は次のように表わされる。



温度別の水素ガス発生量を示した図-17によると温度が低下するにしたがい水素ガス発生量は低下し, 発生開始時間も遅延する。この事から夏季の早急な取り扱いおよび低温時でのアルミニウム粉末の増量を必要とする事がわかる。

セメントの種類別の水素ガス発生量を示した図-18によると B 種高炉セメントは普通セメントに比べて水素ガスの発生は大幅に遅れる。これはセメントミルク中の Ca(OH)<sub>2</sub> の濃度の影響だと思われる。

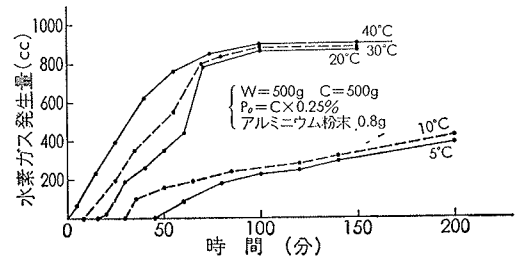


図-17 水素ガス発生反応と温度との関係

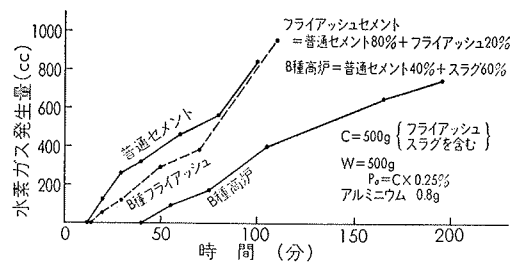


図-18 水素ガス発生反応とセメントの種類との関係

## 4. まとめ

高炉セメントを使用したプレキャストコンクリートのワーカビリティ, 強度におよぼす混和剤, 温度の影響, アルミニウム粉末の影響, 高炉スラグの割合を多くしたモルタルの断熱温度上昇と強度等について検討を行なったが, その結果をまとめると本実験の範囲内では次の事がいえる。

(1)高強度コンクリート用混和剤の使用は早期強度を期待する場合には効果的であるが, 長期になればかならずしも有利とはいえない。

(2)同じ添加量に対する減水剤の効果はモルタルの温度が上昇するにしたがって小さくなり, 温度が高い場合には低い場合に比べて多目に添加する必要がある。

(3)スラグの割合を多くしたモルタルの発熱量はほぼ単位ポルトランドセメント量に比例し, 単位セメント量 10kg の増量あたり 2deg 程度の温度上昇となる。

本実験により適切な減水剤の選定, アルミ粉末の適量添加を行なえば各種の施工条件下においてもフライアッシュセメントに代えて高炉セメントは充分に使用が可能であることがわかった。今後は大規模なプレキャストコンクリート工事にも適用してよいと考えられる。